

(11)Publication number : 2003-014620
(43)Date of publication of application : 15.01.2003

(51)Int.Cl. G01N 21/21
G01J 4/04

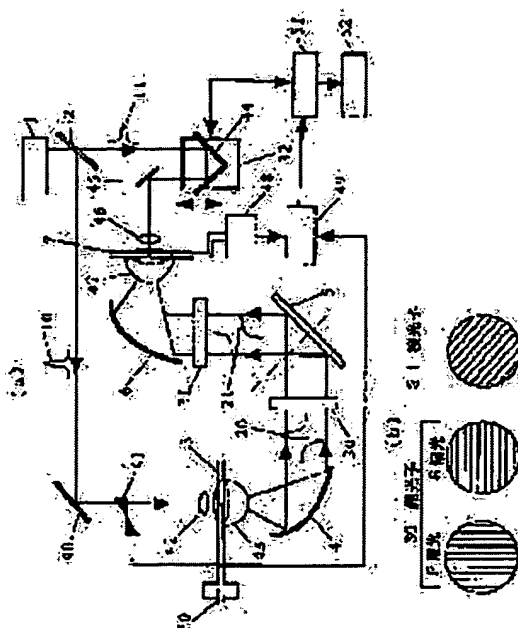
(21)Application number : 2001-195395 (71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD
(22)Date of filing : 27.06.2001 (72)Inventor : NAGASHIMA TAKESHI
HAGIYUKI MASANORI
HIRANAKA KOICHI

(54) POLARIZATION ANALYSIS APPARATUS AND METHOD

(57)Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a time region polarization analysis apparatus for deriving the complex optical constant spectrum of a sample at a tera Hertz region without requiring any reference measurement.

SOLUTION: The polarization analysis apparatus comprises a light source for generating light pulses, a light splitting means for splitting light pulses being emitted from the light source, an electromagnetic wave radiation means for radiating electromagnetic waves by inputting one of the split light pulses, a paralleling means for paralleling the radiated electromagnetic waves, a polarization means for inputting the parallel electromagnetic waves and transmitting polarization electromagnetic waves and switching a polarization surface, an analysis means for inputting polarization electromagnetic waves being reflected by a sample and transmitting polarization electromagnetic constituents, a condensing means for condensing the transmitted polarization electromagnetic constituents, an optical time delay means for delaying the time of the other light pulse of the split light pulses variably, and an electromagnetic wave detection means for inputting condensed polarization electromagnetic wave constituents and the other time-delayed light pulse and converting the condensed polarization electromagnetic wave constituents to electric signals.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 27.06.2001
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number] 3550381
[Date of registration] 30.04.2004
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-14620

(P2003-14620A)

(43) 公開日 平成15年1月15日 (2003.1.15)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード(参考)

G 0 1 N 21/21

G 0 1 N 21/21

Z 2 G 0 5 9

G 0 1 J 4/04

G 0 1 J 4/04

Z

審査請求 有 請求項の数 9 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2001-195395(P2001-195395)

(22) 出願日 平成13年6月27日(2001.6.27)

(71) 出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72) 発明者 長島 健

大阪府吹田市山田東2丁目30-7-306

(72) 発明者 萩行 正憲

大阪府高槻市弥生が丘町25-16

(72) 発明者 平中 弘一

香川県高松市古新町8番地の1 松下電
子工業株式会社内

(74) 代理人 100062926

弁理士 東島 隆治

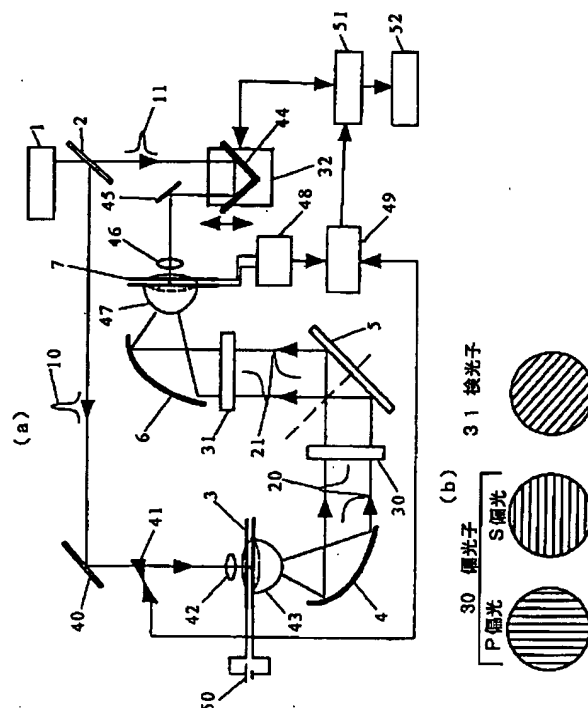
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏光解析装置及び偏光解析方法

(57) 【要約】

【課題】 テラヘルツ領域における試料の複素光学定数スペクトルをリファレンス測定を必要とせずに導出することのできる時間領域偏光解析装置を提供する。

【解決手段】 本発明の偏光解析装置は、光パルスが発生する光源と、光源から射出された光パルスを分割する光分割手段と、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射手段と、放射された電磁波を平行化する平行化手段と、平行化された電磁波を入力して偏光電磁波を透過させ且つ偏光面を切換可能な偏光手段と、試料で反射した偏光電磁波を入力して偏光電磁波成分を透過させる検光手段と、透過した偏光電磁波成分を集光する集光手段と、分割された他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる光学的時間遅延手段と、集光された偏光電磁波成分と時間遅延された他の一方の光パルスとを入力して集光された偏光電磁波成分を電気信号に変換する電磁波検出手段と、を有する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光パルスが発生する光源と、前記光源から射出された光パルスを分割する光分割手段と、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射手段と、放射された電磁波を平行化する平行化手段と、平行化された電磁波を入力して偏光電磁波を透過させ且つ偏光面を切換可能な偏光手段と、試料で反射した前記偏光電磁波を入力して偏光電磁波成分を透過させる検光手段と、前記透過した偏光電磁波成分を集光する集光手段と、分割された他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる光学的時間遅延手段と、集光された前記偏光電磁波成分と前記時間遅延された他の一方の光パルスとを入力して、集光された前記偏光電磁波成分を電気信号に変換する電磁波検出手段と、を有することを特徴とする偏光解析装置。

【請求項 2】 光パルスが発生する光源と、前記光源から射出された光パルスを分割する光分割装置と、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射素子と、放射された電磁波を平行化する第 1 の光学系と、平行化された電磁波を入力して偏光電磁波を透過させ且つ偏光面を切換可能な偏光子と、試料で反射した前記偏光電磁波を入力して偏光電磁波成分を透過させる検光子と、前記透過した偏光電磁波成分を集光する第 2 の光学系と、分割された他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる第 3 の光学系と、集光された前記偏光電磁波成分と前記時間遅延された他の一方の光パルスとを入力して、集光された前記偏光電磁波成分を電気信号に変換する電磁波検出素子と、を有することを特徴とする偏光解析装置。

【請求項 3】 試料で反射した s 偏光電磁波及び p 偏光電磁波の前記電気信号を時間分解した時間分解波形をフーリエ変換し、s 偏光電磁波及び p 偏光電磁波の振幅及び位相の情報を算出する算出手段を更に有することを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の偏光解析装置。

【請求項 4】 前記算出手段が、試料で反射した s 偏光電磁波及び p 偏光電磁波の振幅と位相の情報より、振幅反射率 r_s / r_p 、 $(r_s \text{ 及び } r_p \text{ はそれぞれ s 偏光電磁波及び p 偏光電磁波に対する試料の振幅反射率})$ 及び位相差 $\delta_s - \delta_p$ 、 $(\delta_s \text{ 及び } \delta_p \text{ はそれぞれ試料で反射された s 偏光電磁波及び p 偏光電磁波の位相})$ を用いて複素光学定数スペクトルを更に導出することを特徴とする請求項 3 に記載の偏光解析装置。

【請求項 5】 前記電磁波の周波数が 100 GHz から 20 THz の周波数範囲内であることを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置。

【請求項 6】 前記光源が、フェムト秒パルスレーザ又は半導体レーザであることを特徴とする請求項 1 から請求項 5 のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置。

【請求項 7】 前記光分割手段又は前記光分割装置が、

ビームスプリッタであることを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置。

【請求項 8】 光源から光パルスが発生させる発生ステップと、前記光源から射出された光パルスを分割する分割ステップと、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射ステップと、放射された電磁波を平行化する平行化ステップと、平行化された電磁波から第 1 の偏光電磁波を抽出する第 1 の偏光ステップと、分割された他の一方の光パルスを用いて前記試料で反射した前記第 1 の偏光電磁波を検出する第 1 の検出ステップと、平行化された電磁波から第 2 の偏光電磁波を抽出する第 2 の偏光ステップと、前記他の一方の光パルスを用いて試料で反射した前記第 2 の偏光電磁波を検出する第 2 の検出ステップと、前記他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる光学的時間遅延ステップと、を有することを特徴とする偏光解析方法。

【請求項 9】 前記第 1 の偏光電磁波が s 偏光電磁波（入射面に対して電場ベクトルが垂直な電磁波）及び p 偏光電磁波（入射面に対して電場ベクトルが平行な電磁波）のいずれか一方であり、前記第 2 の偏光電磁波が他の一方であることを特徴とする請求項 8 に記載の偏光解析方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、分光学的方法による材料の光学的及び電気的特性測定を行う解析装置及び解析方法に関し、特に、リファレンス測定を必要とせず非破壊・非接触で材料を測定する解析装置及び解析方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】テラヘルツ波領域（100 GHz ～ 20 THz）における時間領域分光法は、この周波数帯における試料の屈折率と消衰係数からなる複素屈折率、複素電気伝導度、あるいは複素誘電率などの複素光学定数を、Kramers-Kronig変換などを必要とせずに、直接的に測定できるという特徴を有する分光法である。さらにテラヘルツ波領域の複素光学定数から、固体、液体又はガスに関する、他の周波数帯での測定では得ることが困難な種々の情報が得られる。しかも、複素光学定数の非接触、非破壊測定が可能である。このような背景からテラヘルツ波領域の時間領域分光法の研究開発及びそれを用いた物性研究が精力的に行われている。

【0003】テラヘルツ時間領域分光法を使用した多くの研究が固体、液体、及びガスについて実施されているが、これら研究の多くはテラヘルツ電磁波の透過測定を実施している。他の従来の幾つかの研究においては、テラヘルツ電磁波の透過率が小さな試料の光学定数を導出するために、当該試料を反射した電磁波を測定する。

【0004】従来例 1 の透過測定による時間領域分光法の概要を図 5 を参照して説明する。従来例 1 の時間領域

分光法では、試料を透過した電磁波と試料を置かない場合の電磁波（リファレンスデータ）とを測定する。図5は従来例1の時間領域分光法の概略構成図である。パルスレーザ100は光レーザパルス101を発生する。ビームスプリッタ102は、入力した光レーザパルス101を分岐して光レーザパルス103及び104を出力する。光レーザパルス103は電磁波放射用を使用され、光レーザパルス104は電磁波検出用光伝導素子110のトリガー用に使用する。光レーザパルス103は、ミラー120、チョッパ105、レンズ106を介してテ
10 ラヘルツ電磁波放射用光伝導素子である放射アンテナ108に入射される。

【0005】放射アンテナ108は光レーザパルス103を入力してテラヘルツ電磁波124を放射する。生成されたテラヘルツ波124は、半球形レンズ122及び放物面鏡107で平行化され、試料109に入射される。安定化電源121は、放射アンテナ108に電力を供給する。チョッパ105は開口部と遮蔽部を有する回転体で、1〜3kHzの周期で光レーザパルス103の通過と遮断とを繰り返す。試料109を透過したテラ
20 ヘルツ電磁波125は、放物面鏡113及び半球形レンズ123で集光され、放射アンテナ108と対称な位置に置かれた電磁波検出用光伝導素子である受信アンテナ110に入射される。検出素子である受信アンテナ110はフェムト秒レーザパルス104によって励起された瞬間に印加されているテラヘルツ電磁波の電場に比例した信号を出力する。

【0006】ビームスプリッタ102から出力された他のレーザパルス104は、反射鏡であるリトロリフレクタ111、ミラー128、129、レンズ130を経由
30 して受信アンテナ110に入力される。リトロリフレクタ111を取り付けた可動ステージ112を矢印の方向に移動させることにより、レーザパルス104が受信アンテナ110を励起するタイミング（照射タイミングの時間遅延量）は変化する。電流増幅器126は、受信アンテナ110の出力信号を増幅する。ロックインアンプ127は、電流増幅器126の出力信号とチョッパ105の回転制御信号（又は回転検出信号）とを入力し、電流増幅器126の出力信号の中からチョッパ105の回転に応じた成分を取り出す。

【0007】可動ステージ112を移動させて時間遅延量を変えながら、各遅延時間におけるロックインアンプ127の出力信号（テラヘルツ電磁波の電場）の振幅を測定する。その結果図6のような放射されたテラヘルツ電磁波の時間分解波形（電場の振幅／時間遅延量特性）を測定できる。以上のようにテラヘルツ電磁波の時間分解波形そのもの、すなわち電磁波の振幅／位相特性を測定できる。電磁波のパスに試料を挿入した場合とそうでない場合とでそれぞれ時間分解波形を測定し、それぞれをフーリエ変換して得られた複素スペクトルの比をとる
50

と、試料の複素透過係数スペクトルが得られる。これから試料の複素屈折率や複素電気伝導率などの複素光学定数をテラヘルツ波領域の広い範囲で一挙に求めることができる。

【0008】従来例2の時間領域分光法では、測定対象である試料表面で反射した電磁波の時間分解波形と、反射率1であることが既知である基準となる材料（リファレンス）の表面で反射した電磁波の時間分解波形とを測定し、両者の複素スペクトルの比をとって複素反射係数スペクトルを得る。従来例1では試料の透過光を測定し、従来例2では試料の反射光を測定する。それ以外の点で両者は同一の構成を有数する。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし反射光を利用する従来例2の時間領域分光法では、位相の情報を十分な精度で知るためには試料とリファレンスの反射面の位置を数 μm 以下の精度で一致させる必要がある（T. I. Jeon and D. Grischkowsky: Applied Physics Letters, Vol. 72, 3032-3035 (1998)）。これは一般的な試料ホルダーの機械的精度では非常に困難である。この困難を避けるために膜厚及び屈折率が既知の透明材料を試料表面に張り付け、透明膜表面における反射電磁波及び透明膜と試料の界面における反射電磁波の両者を測定し透明膜の膜厚及び屈折率を考慮したデータ処理によって、十分な精度を得る方法が考案されている（葉嶋 茂樹ら、2001年（平成13年）秋季第61回応用物理学会学術講演会）。しかしながら、この手法は試料に加工が必要であり、かつデータ処理が煩雑という問題がある。

【0010】反射光を利用する時間領域分光法において、リファレンス測定をせずに光学定数を導出しようとする試みもなされている。試料の入射角を変えながら反射波形を測定してブリースター角を求め、それらのデータから試料である基板上の薄膜の屈折率を求める手法が提案されている（M. Li et al.: Applied Physics Letters, Vol. 74, 2113-2115 (1999)）。この手法はごく薄い膜の光学定数を測定できる点で優れているが、入射角を変えるたびに受信アンテナの位置を動かす必要がある。時間領域分光法においては受信アンテナをトリガーするフェムト秒パルスレーザ光の光路を入射角を変えるたびに調整する必要があり、膨大な時間と手間がかかり実用的でない。しかも提案されている手法では連続的なスペクトルは得られない。

【0011】

【課題を解決するための手段】上記の課題にかんがみて、本発明は、単一の入射角での反射測定において、リファレンス測定なしに、なおかつ試料に加工を施すことなく、電磁波の透過率の低い試料でも複素光学定数スペクトルを高精度で測定できる方法及び装置を提供することを目的とする。

【0012】上記目的を達成するために、本発明は下記

の構成を有する。請求項1の発明は、光パルスが発生する光源と、前記光源から射出された光パルスを分割する光分割手段と、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射手段と、放射された電磁波を平行化する平行化手段と、平行化された電磁波を入力して偏光電磁波を透過させ且つ偏光面を切換可能な偏光手段と、試料で反射した前記偏光電磁波を入力して偏光電磁波成分を透過させる検光手段と、前記透過した偏光電磁波成分を集光する集光手段と、分割された他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる光学的時間遅延手段と、集光された前記偏光電磁波成分と前記時間遅延された他の一方の光パルスとを入力して、集光された前記偏光電磁波成分を電気信号に変換する電磁波検出手段と、を有することを特徴とする偏光解析装置である。

【0013】請求項2の発明は、光パルスが発生する光源と、前記光源から射出された光パルスを分割する光分割装置と、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射素子と、放射された電磁波を平行化する第1の光学系と、平行化された電磁波を入力して偏光電磁波を透過させ且つ偏光面を切換可能な偏光子と、試料で反射した前記偏光電磁波を入力して偏光電磁波成分を透過させる検光子と、前記透過した偏光電磁波成分を集光する第2の光学系と、分割された他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる第3の光学系と、集光された前記偏光電磁波成分と前記時間遅延された他の一方の光パルスとを入力して、集光された前記偏光電磁波成分を電気信号に変換する電磁波検出素子と、を有することを特徴とする偏光解析装置である。

【0014】請求項3の発明は、試料で反射したs偏光電磁波及びp偏光電磁波の前記電気信号を時間分解した時間分解波形をフーリエ変換し、s偏光電磁波及びp偏光電磁波の振幅及び位相の情報を算出する算出手段を更に有することを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の偏光解析装置である。フーリエ変換とは時間的に変動する量の周波数成分を抽出する一般的な数値計算処理である。

【0015】請求項4の発明は、前記算出手段が、試料で反射したs偏光電磁波及びp偏光電磁波の振幅と位相スペクトルより、振幅反射率比 r_s/r_p 、(r_s 及び r_p はそれぞれs偏光電磁波及びp偏光電磁波に対する試料の振幅反射率)及び位相差 $\delta_s - \delta_p$ 、(δ_s 及び δ_p はそれぞれ試料で反射されたs偏光電磁波及びp偏光電磁波の位相)を用いて複素光学定数スペクトルを更に導出することを特徴とする請求項3に記載の偏光解析装置である。

【0016】請求項5の発明は、前記電磁波の周波数が100GHzから20THzの周波数範囲内であることを特徴とする請求項1から請求項4のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置である。

【0017】請求項6の発明は、前記光源が、フェムト

秒パルスレーザ又は半導体レーザであることを特徴とする請求項1から請求項5のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置である。

【0018】請求項7の発明は、前記光分割手段又は前記光分割装置が、ビームスプリッタであることを特徴とする請求項1から請求項6のいずれかの請求項に記載の偏光解析装置である。

【0019】請求項8の発明は、光源から光パルスが発生させる発生ステップと、前記光源から射出された光パルスを分割する分割ステップと、分割した一方の光パルスを入力して電磁波を放射する電磁波放射ステップと、放射された電磁波を平行化する平行化ステップと、平行化された電磁波から第1の偏光電磁波を抽出する第1の偏光ステップと、分割された他の一方の光パルスを用いて前記試料で反射した前記第1の偏光電磁波を検出する第1の検出ステップと、平行化された電磁波から第2の偏光電磁波を抽出する第2の偏光ステップと、前記他の一方の光パルスを用いて試料で反射した前記第2の偏光電磁波を検出する第2の検出ステップと、前記他の一方の光パルスを可変的に時間遅延させる光学的時間遅延ステップと、を有することを特徴とする偏光解析方法である。

【0020】請求項9の発明は、前記第1の偏光電磁波がs偏光電磁波(入射面に対して電場ベクトルが垂直な電磁波)及びp偏光電磁波(入射面に対して電場ベクトルが平行な電磁波)のいずれか一方であり、前記第2の偏光電磁波が他の一方であることを特徴とする請求項8に記載の偏光解析方法である。

【0021】本発明は、単一の入射角での反射測定において、リファレンス測定なしに、なおかつ試料に加工を施すことなく、電磁波の透過率の低い試料でも複素光学定数スペクトルを高精度で測定できる偏光解析装置及び偏光解析方法を実現出来るという作用を有する。

【0022】

【発明の実施の形態】以下本発明の実施をするための最良の形態を具体的に示した実施例について、図面とともに記載する。

【0023】《実施例1》以下実施例を用いて本発明の偏光解析装置及び偏光解析方法を具体的に説明する。なお、本発明は下記の実施例に限定して解釈されるものではない。図1(a)は本発明の実施例の偏光解析装置の概略構成図である。パルスレーザ(光源)1は光レーザパルスが発生する。光源としてはフェムト秒パルスレーザ又は半導体レーザを使用する。当該光レーザパルスはテラヘルツ波領域(100GHzから20THz)のレーザ光である。ビームスプリッタ2(光分割手段、光分割装置)は、入力した光レーザパルスを分岐して光レーザパルス10及び11を出力する。ビームスプリッタ2は、例えばハーフミラーである。光レーザパルス10は電磁波放射用に、光レーザパルス11は光伝導アンテナ

(受信アンテナ) 7のトリガー用に使用する。

【0024】光レーザパルス10は、ミラー40、チョッパ41、レンズ42を介してテラヘルツ電磁波放射用光伝導素子である放射アンテナ3(電磁波放射手段、電磁波放射素子)に入射する。光レーザパルス10の照射によって放射アンテナ3に瞬間的に電流が流れる。放射アンテナ3にはほぼ光レーザパルス10が照射されている間だけ過渡電流が流れ、放射アンテナ3はテラヘルツ電磁波20を放射する。使用した放射アンテナ3は偏光特性を持つが、放射直後の電磁波の最大の大きさを持つ電場ベクトルが、電磁波伝搬方向に対して垂直な面内にあり、なおかつ入射面に対して45度の角度をなすように設置する。安定化電源50は、放射アンテナ3に電力を供給する。チョッパ41は開口部と遮蔽部を有する回転体で、1~3kHzの周期で光レーザパルス10の通過と遮断とを繰り返す。

【0025】生成されたテラヘルツ電磁波20は、半球形レンズ43及び放物面鏡4(平行化手段、第1の光学系)で平行化され、偏光子30(偏光手段)に入射される。偏光子30は、テラヘルツ電磁波20の中から特定の偏光電磁波のみを透過させる。偏光子30は太さ数 μ mの金属ワイヤーを10 μ m程度の間隔で多数並べたワイヤグリッドである。偏光子30は試料5の直前あるいは放射アンテナ3の直後に置くことができる。また偏光子30は方位角を精密に制御できるホルダに取り付けるのが好ましい。

【0026】まず放射アンテナ3から放射されたテラヘルツ電磁波20のうち偏光子30によってs偏光電磁波(又はp偏光電磁波)を取り出す(偏光子30を透過させる。)。この状態で偏光子30の方位角を90度回転させればp偏光電磁波(又はs偏光電磁波)が取り出される(図1(b)参照)。s偏光電磁波は入射面に対して電場ベクトルが垂直な電磁波であり、p偏光電磁波は入射面に対して電場ベクトルが平行な電磁波である。

【0027】放射アンテナ3に偏光特性がなければ、偏光子30を透過したs偏光電磁波及びp偏光電磁波の振幅及び位相は同一である。放射アンテナ3が偏光特性を持つことがある。この場合は放射アンテナ3から放射された直後の位置で最大の大きさを持つ電場ベクトルが入射面に対し45度の角度をなすように放射アンテナ3を設置する。これによりs及びp偏光電磁波の振幅及び位相は同一になる。上記調整の後、偏光子の方位角を調整してs及びp偏光電磁波を試料に平行に斜入射させる。

【0028】試料5を反射したテラヘルツ電磁波21(s偏光電磁波又はp偏光電磁波)は、検光子31(検光手段)に平行に入射される。検光子31は偏光子30と同様のワイヤグリッドであり(図1(b)参照)、反射電磁波の中から、受信アンテナ7が検出感度の最も高い偏光成分のみを通過させる。検光子31を透過したテラヘルツ電磁波21は放物面鏡6及び半球形レンズ47

(集光手段、第2の光学系)で集光され、電磁波検出用光伝導素子である受信アンテナ7(電磁波検出手段、電磁波検出素子)に入射される。検出素子である受信アンテナ7はフェムト秒レーザパルス11によって励起された瞬間に印加されているテラヘルツ電磁波の電場に比例した信号を出力する。受信アンテナ7はフェムト秒レーザパルス11によって励起されている間だけ過渡的に導電性になり、光照射をやめると再び絶縁性になる。受信アンテナ7は偏光特性を持つが、その検出感度の最も高い方向が電磁波伝搬方向に対して垂直な面内にあり且つ入射面に対して45度の角度をなすように、受信アンテナ7を設置する。

【0029】ビームスプリッタ2で分割されたもう一方の電磁波検出用の光レーザパルス11は、反射鏡であるリトロフレクタ44、ミラー45、レンズ46を経由して受信アンテナ7に入力される。光レーザパルス11が受信アンテナ7に入力されると、受信アンテナ7は瞬間的に伝導性を示す。この瞬間に受信アンテナ7に到達した反射電磁波21の電場に比例した電流が流れる。反射鏡であるリトロフレクタ44(光学的時間遅延手段、第3の光学系)は、ビームスプリッタ2と受信アンテナ7の間に配置されている。リトロフレクタ44を取り付けた可動ステージ32を矢印の方向に移動させることによりレーザパルス11の光路長が変化し、レーザパルス11が受信アンテナ7を励起するタイミング(照射タイミングの時間遅延量(位相))は変化する。電流増幅器48は、受信アンテナ7の出力信号を増幅する。ロックインアンプ49は、電流増幅器48の出力信号とチョッパ41の回転制御信号(又は回転検出信号)とを入力し、電流増幅器48の出力信号の中からチョッパ41の回転に応じた成分を取り出す。

【0030】可動ステージ32を移動させて時間遅延量を変えながら、各遅延時間におけるロックインアンプ49の出力信号(テラヘルツ電磁波の電場)の振幅を測定する。その結果放射されたs偏光電磁波及びp偏光電磁波の時間分解波形(時間遅延量/振幅特性)が得られる。入射角45度の場合のn型Siウェハ(0.136 Ω cm、厚さ0.7mm)のs及びp偏光電磁波の反射電磁波の時間分解波形 $w_s(t)$ 及び $w_p(t)$ (t:時間)を図2に示す。また図2のデータからそれぞれをフーリエ変換して比をとって得られたエリプソメトリック・アングルの周波数変化を図3に示す。図3のデータから計算された複素屈折率スペクトルを図4に示す。なお、図3及び図4中の実線はドルーデモデルによる計算値を示す。

【0031】実施例の偏光解析装置においては、コンピュータ51が指令を送って可動ステージ32を段階的に移動させながら(レーザパルス11が受信アンテナ7を励起するタイミングを変えながら)、ロックインアンプ49の出力信号(s偏光電磁波の出力信号及びp偏光電磁波の出力信号)を順次コンピュータ51に入力する。

ロックインアンプ49の出力信号(時間分解波形)は、A/D変換された後、コンピュータ51のメモリに格納される。

【0032】他の実施例においては、測定者が可動ステージ32を段階的に移動させながら、ロックインアンプ49の出力信号を順次読み取り、読み取った値をコンピュータ51に入力する。偏光子30のワイヤグリッドについて、s偏光電磁波を通す向きとp偏光電磁波を通す向きとを電動で切換えても良く、手動で切換えても良い。測定の際、動かすのは偏光子30の方位角及び可動ステージ32の位置だけである。平行化手段、集光手

* 段、光学的時間遅延手段は放物面鏡やレンズなどの光学的手段で構成される。

【0033】コンピュータ51(算出手段)は、上記の測定データに基づいて下記の計算を行い、計算結果であるパラメータをディスプレイ52に表示する。s偏光電磁波及びp偏光電磁波の時間分解波形 $w_s(t)$ 及び $w_p(t)$ (t :時間)をそれぞれをフーリエ変換すると、反射電磁波の振幅と位相の情報を含んだ複素スペクトル $E_s(\nu)$ 、 $E_p(\nu)$ がそれぞれ得られる。

【0034】

【数1】

$$E_s(\nu) = |E_s(\nu)| e^{i\delta_s(\nu)} \quad (1)$$

【0035】

※ ※ 【数2】

$$E_p(\nu) = |E_p(\nu)| e^{i\delta_p(\nu)} \quad (2)$$

【0036】s偏光電磁波及びp偏光電磁波の複素スペクトルの比をとると、s偏光電磁波及びp偏光電磁波の振幅反射率比 $r_p(\nu)/r_s(\nu)$ 及び位相差 $\delta_p - \delta_s$ 、★

★のスペクトルが得られる。

【0037】

【数3】

$$\frac{E_p(\nu)}{E_s(\nu)} = \frac{|E_p(\nu)|}{|E_s(\nu)|} e^{i\{\delta_p(\nu) - \delta_s(\nu)\}} = \frac{|r_p(\nu)|}{|r_s(\nu)|} e^{i\{\delta_p(\nu) - \delta_s(\nu)\}} \quad (3)$$

【0038】これらは従来知られている偏光解析法におけるエリブソメトリック・アングルのそれぞれ $\tan \Psi(\nu) \equiv r_p / r_s$ 、 $\Delta(\nu) \equiv \delta_p - \delta_s$ に対応している。エリブソメトリック・アングルから偏光解析法を援用して複素光学定数スペクトルを導出することができる。得られたエリブソメトリック・アングルの周波数変化から複素光学定数スペクトルを導出する方法は古くから知られており、例えばR.M. A. Azzam and N. M. Bashara, "Ellipsometry and Polarized Light" (North-Holland, 1987)などに記載されている。複素光学定数を $(n - ik)$ (n は複素光学定数の実部部 k は複素光学定数の虚部)とし、複素誘電率を $\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ (ϵ_1 は複素誘電率の実部、 ϵ_2 は複素誘電率の虚部)とする。 θ_0 を電磁波の試料への入射角として、 ϵ_1 は式(4)のように n と k で表される。

☆11and, 1987)などに記載されている。複素光学定数を $(n - ik)$ (n は複素光学定数の実部部 k は複素光学定数の虚部)とし、複素誘電率を $\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ (ϵ_1 は複素誘電率の実部、 ϵ_2 は複素誘電率の虚部)とする。 θ_0 を電磁波の試料への入射角として、 ϵ_1 は式(4)のように n と k で表される。

【0039】

【数4】

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 = \sin^2 \theta_0 \left[1 + \frac{\tan^2 \theta_0 \{ \cos^2(2\Psi) - \sin^2(2\Psi) \sin^2 \Delta \}}{\{ 1 + \sin(2\Psi) \cos \Delta \}^2} \right] \quad (4)$$

【0040】同様に ϵ_2 は式(5)のように n と k で表される。

◆ 【0041】

◆ 【数5】

$$\epsilon_2 = 2nk = \sin^2 \theta_0 \frac{\tan^2 \theta_0 \sin(4\Psi) \sin \Delta}{\{ 1 + \sin(2\Psi) \cos \Delta \}^2} \quad (5)$$

【0042】さらに、これらの複素誘電率は、複素電気伝導度 $\sigma = \sigma_1 - i\sigma_2$ (σ_1 は複素電気伝導度の実部、 σ_2 は複素電気伝導度の虚部)と式(6)及び式(7)のような関係式があり、電極パターンを形成する*

* ことなく、非接触、非破壊で電気特性を測定出来る。 ϵ は真空中の誘電率である。

【0043】

【数6】

$$\sigma_1 = \frac{\nu}{4\pi} \epsilon_2 \quad (6)$$

【0044】

【数7】

$$\sigma_2 = \frac{\nu}{4\pi} (\epsilon_0 - \epsilon_1)$$

【0045】本発明によれば単一の入射角におけるs偏光電磁波及びp偏光電磁波の反射波の時間分解波形測定のみでエリプソメトリック・アングルである $\tan \Psi$ 及び Δ が求められ、入射角依存性を測定する必要がない。さらに本発明によれば、以上で示したように、互いに直交する方位角に偏光子を設定した状態における各々の反射電磁波の時間分解波形を測定することで試料の複素光学定数スペクトルを導出できる。従来の分光偏光解析方法では偏光子の方位角依存性を詳細に知ることが必要であったため、方位角をわずかずつ変えながら多数回測定する必要があったが、本発明によれば、2回のみの測定で複素光学定数スペクトルが得られる。本発明のテラヘルツ波偏光解析方法及び装置は、試料で反射された複数の偏光電磁波の時間分解波形を測定することにより、種々の複素データを導出出来る。本発明のテラヘルツ波偏光解析方法及び装置においては、リファレンスデータを測定しない。

【0046】

【発明の効果】以上のように金属ミラーなどのリファレンス測定なしにs偏光及びp偏光電磁波の反射波の時間分解波形の測定から容易に試料の複素光学定数スペクトルが得られる。さらに試料は電磁波が照射される部位が平面であれば良く、特別な加工は必要ない。例えば薄膜製造装置に組み込んで、半導体あるいは超伝導薄膜の自由キャリア密度及び移動度、あるいは強誘電体の複素誘電率のその場観察が可能になる。本発明によれば、単一の入射角での反射測定において、リファレンス測定なしに、なおかつ試料に加工を施すことなく、電磁波の透過率の低い試料でも複素光学定数スペクトルを高精度で測定できる偏光解析装置及び偏光解析方法を実現出来るという有利な効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施例の偏光解析装置の概略構成図である。

【図2】 本発明に係る反射偏光電磁波の時間分解波形を示す図である。

【図3】 図2のデータから計算されたエリプソメトリック・アングル（振幅反射率と位相差）の周波数依存性を示す図である。

【図4】 図3のデータから計算された複素屈折率を示す図である。

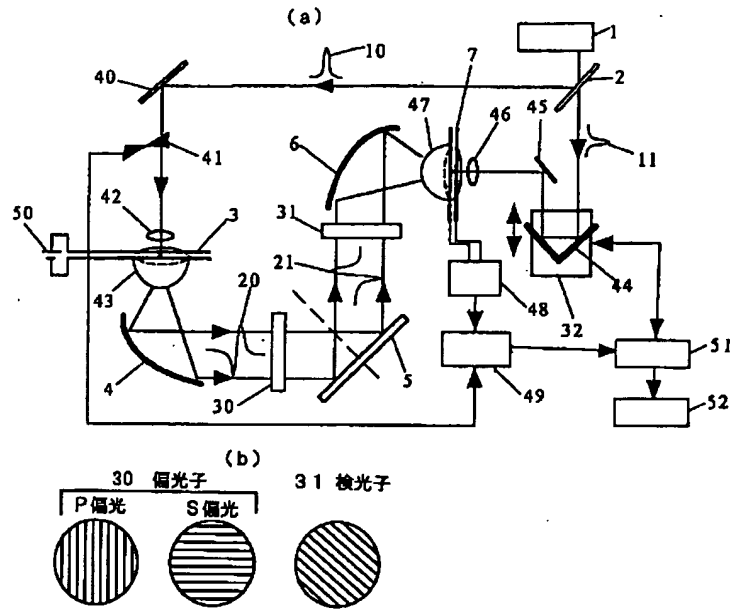
【図5】 従来例1の時間領域分光解析装置の概略構成図である。

10 【図6】 従来例1の時間領域分光解析装置で得られる検出信号（時間分解波形）の概念図である。

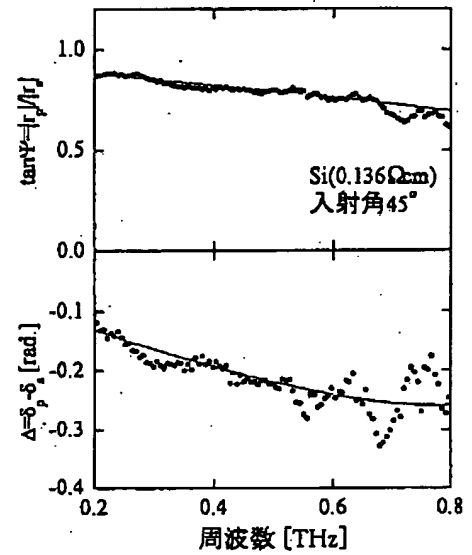
【符号の説明】

- 1、100 パルスレーザ
- 2、102 ビームスプリッタ
- 3、108 電磁波放射用光伝導素子
- 4、6、107、113 放物面鏡
- 5、109 試料
- 7、110 電磁波検出用光伝導素子（受信アンテナ）
- 20 10、11、101、103、104 光レーザパルス
- 20、124 電磁波
- 21 反射電磁波
- 30 偏光子
- 31 検光子
- 32、112 可動ステージ
- 40、45、120、128、129 ミラー
- 41、105 チョッパ
- 42、46、106、130 レンズ
- 30 43、47、122、123 半球レンズ
- 44、111 リトロリフレクタ
- 48、126 電流増幅器
- 49、127 ロックインアンプ
- 50、121 安定化電源
- 51 コンピュータ
- 52 ディスプレイ
- 125 透過電磁波

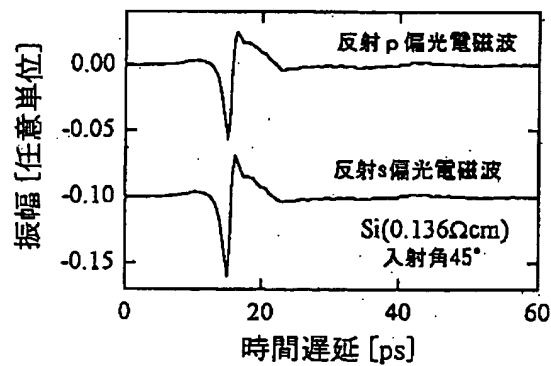
【図1】



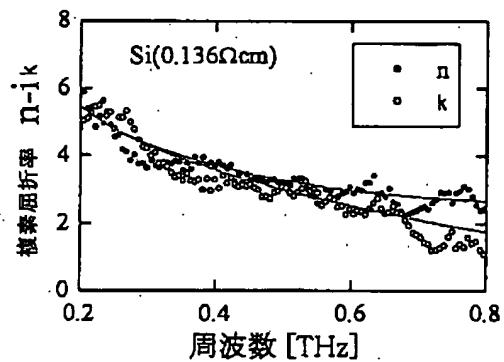
【図3】



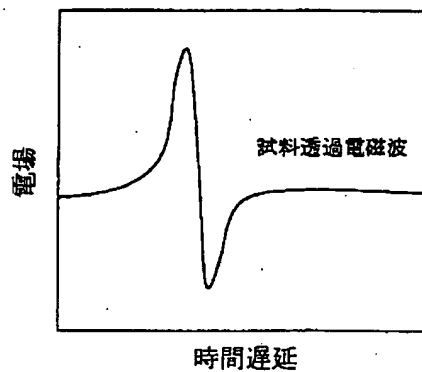
【図2】



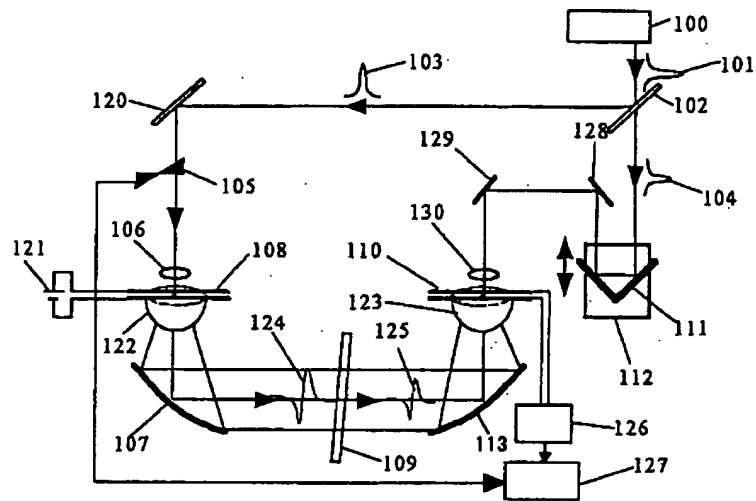
【図4】



【図6】



【図5】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G059 AA05 DD13 EE04 EE12 FF04
GG01 GG08 HH06 JJ05 JJ11
JJ19 JJ22 JJ24 KK01 MM01
MM09 MM10 PP10